Л.В.Коновалов

НАЗВАНИЕ КНИГИ

ВГИК
2007

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ КРИВАЯ

Оценить свойства пленок можно двумя способами

В прежние времена вопрос о пригодности того или иного материала решался исключительно методом пробной съемки. Этот метод можно было бы признать безнадежно устаревшим, если бы время от времени к нему не прибегали, как, например, при репродукционных работах, при форсированном проявлении, и этот метод не давал бы хороших результатов. 10-15 лет назад, когда фабрика «Свема» еще выпускала цветные обращаемые кинофотопленки для фотолюбителей, практическую светочувствительность обращаемых кино-фотопленок определяли методом фотопроб. На пленку, например, «ЦО-65» снимался экспозиционный клин на разную светочувствительность, со значениями как в большую, так и в меньшую сторону (так называемая «вилка»), и после стандартной химико-фотографической обработки выбирался наилучший кадр. Поэтому на коробочке фотопленки «ЦО-65» на боковой стороне вполне мог появиться индекс светочувствительности 90 или 45 единиц.

Такой метод мы назовем экспонометрическим, в отличие от сенси¬тометрического, где вместо фотосъемки реального объекта на испытуемый фотоматериал в темной комнате с помощью прибора впечатывается (экспонируется) специальный тест-объект – ряд серых полей.

С помощью прибора, называемого сенситометром испытуемому материалу сообщается ряд точно отмеренных экспозиций от стандартного источника света.

Затем, после обработки пленки, промеряется плотность образовавшихся на пленке почернений. На специальном бланке строится зависимость между количеством света, прошедшим через разные прямоугольные поля на пленку и плотностью, образовавшейся под этими полями.

Эту зависимость по предложению Хёртера и Дриффилда (1892 г.) принято выражать графически в форме некоторой кривой, получившей название «характеристической кривой». По этой зависимости и определяются основные характеристики пленки — светочувствительность, степень контрастности, широта, передаваемый интервал яркостей.

Глава I

КАК ЭКСПОНИРУЕТСЯ ФОТОПЛЕНКА

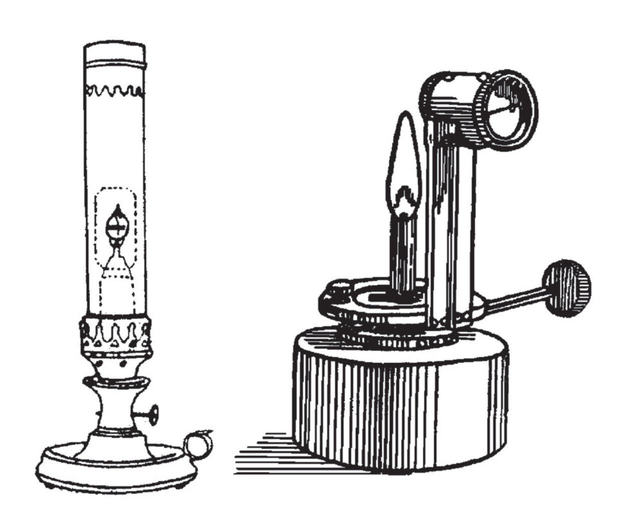
В конце позапрошлого века при тестировании фотоматериалов экспонирование осуществлялось, например, следующим образом: испытуемый светочувствительный материал закладывался в кассету, которая помещалась на определенном расстоянии от источника света. Задвижка кассеты выдвигалась на 1 см и производилось экспонирование в течение, например, 5 сек. Далее задвижка выдвигалась еще на 1 см и материал экспонировался еще 5 сек. Тогда первая экспонированная полоска получала экспозицию в 5 + 5 = 10 сек. После третьей экспозиции эта полоска получала освещение уже в 15 сек, а вторая - в 10. Продолжая экспонировать таким образом, мы получим на испытуемом светочувствительном слое ряд возрастающих в арифметической прогрессии экспозиций. Проэкспонировав таким образом два исследуемых материала и одинаково по времени проявив их, мы получим представление об относительной светочувствительности материалов.
Первый научно обоснованный и приблизительно отвечающий современным представлениям экспозиционный прибор для определения светочувствительности был разработан русским ученым и изобретателем, поляком по происхождению Л.В.Варнеке (1880).

Прибор для экспонирования называется сенситометром («sentio» — чувствовать, «metrum» — измерять), хотя непосредственно этот прибор ничего не измеряет, а только лишь экспонирует пленку. В свое время предлагалось называть эти приборы «сенситографами» или, наконец, просто «приборами для освещения», однако эти названия не прижились.

Поскольку прибор предназначен для экспонирования, в нем обязательно имеется стандартизованный источник света. В качестве источника света до 20—30-х гг. XX в. при испытаниях пленок часто предпочтение отдавалось легко воспроизводимым газовым или спиртовым горелкам.

Например, Е.Гольдберг (известный своим «правилом Гольдберга» — произведение гаммы негатива на гамму позитива должно равняться единице), при испытании фотопластинок (1909-1918 гг.) применял бензиновую свечу Шайнера, ставя ее на расстоянии одного метра от экспонируемой кассеты. Время экспозиции достигало одной минуты.

До 1938 года у нас и до 1926 года за границей в качестве сенситометрического источника света применялась исключительно лампа Гефнера, предложенная еще в 1884 году Гефнером фон Альтенеком. Ее цветовая температура была 1830 K, как у парафиновой свечки. Лампа Гефнера, в течение нескольких десятков лет была единственным стандартным источником света, и сила света ее (так называемая свеча Гефнера) употреблялась в качестве единицы при измерении силы света всех других источников.



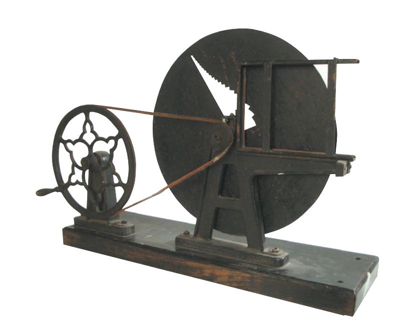
Лампа Шайнера и лампа Гефнера

В качестве горючего материала в ней применялся уксусно-амиловый эфир. Высота пламени лампы должна быть равна 40 мм, и эта высота устанавливалась с помощью особых визиров.

Вакуумная вольфрамовая электрическая лампа в качестве международного стандартного источника света для сенситометрических испытаний была принята только в 1928 г. VII международным фотографическим конгрессом.

Свет, который попадает на испытуемый материал, необходимо каким-то образом дозировать. В разные годы дозировка осуществлялась разными способами. Вначале наибольшее распространение получили сенситометры так называемого «дискового» типа. Первым из таких приборов был сенситометр Хёртера и Дриффилда. Основной частью сенситометра являлся металлический диск диаметром около 30 см, в котором сделано 9 вырезов разного размера. По одну сторону диска на определенном расстоянии от него находился источник света, по другую сторону диска, вплотную к нему, помещалась кассета со светочувствительным материалом. При экспонировании, которое продолжалось от 20 секунд до нескольких минут, диск постоянно вращался, и те участки пленки, которые находились за узкой прорезью, получали маленькую экспозицию от ацетиленовой горелки, а участки пленки ближе к оси вращения диска – соответственно большие экспозиции.





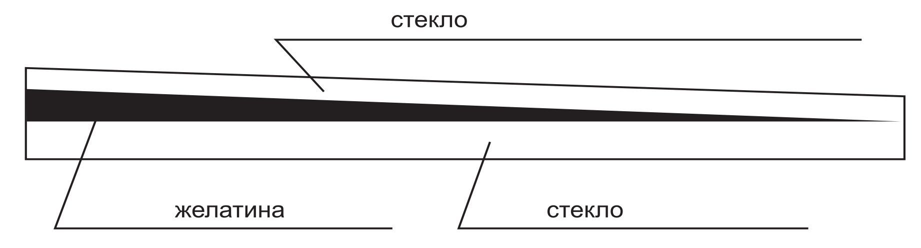


Диск сенситометра Хёртера и Дриффилда

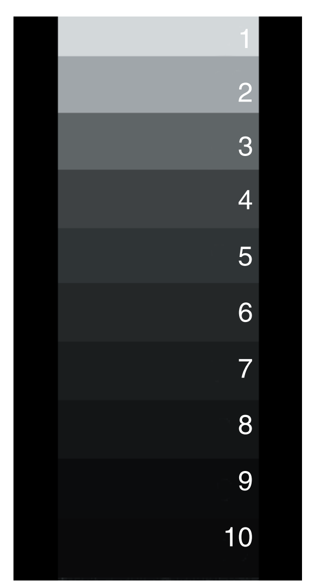
Недостатком этого сенситометра являлись слишком большие скачки между соседними экспозициями — в 2 раза. С целью устранения этого недостатка Шайнер в 1894 г. предложил другую конструкцию вырезов дисков, в дальнейшем усовершенствованную Эдером (1898 г.). Сенситометр Шайнера-Эдера имел уже не 9, а 23 выреза. (Рисунок)

В течение десятилетий такой метод экспонирования, через диск с прорезями, являлся общепринятым при испытании светочувствительных материалов как в нашей стране, так и за рубежом. Однако такие методы экспонирования давали очень небольшую широту изменения экспозиций, порядка 1:50 - 1:100.

В 1909 Гольдбергом был предложен нейтрально-серый оптический клин, представлявший собою клинообразный слой окрашенной тушью или размолотым графитом желатины, заклеенный между двумя тонкими стеклянными пластинками.



Клин Гольдберга (вид сбоку)



Часть оптического клина сенситометра ЦС-2м в масштабе 1:1

В современных сенситометрах дозировка освещения производится с помощью нейтрально-серого пластикового оптического клина, имеющего от 21 (Кодак тип-7) до 30 полей (ЦС-2м), ступенчато отличающихся друг от друга количеством пропускаемого света.

Основное достоинство нейтрально-серого клина как приспособления, дозирующего освещение, заключается в том, что он легко позволяет получить очень большой интервал экспозиций, до 1: 60 000. Изображение оптического клина на фотопленке называют сенситограммой

Экспозиции[1], которые получает фотопленка в сенситометре, откладываются по горизонтальной шкале сенситометрического бланка, обозначенной буквой Н.

Экспозицией оценивается количество света, которое получила пленка, и это количество света можно найти простым перемножением освещенности на пленке на время экспонирования: Н = Е • t. Поскольку из двух сомножителей один (“t”, время) всем знаком, расшифруем другой сомножитель – освещенность. В нашей стране освещенность обозначается буквой Е. В большинстве других стран для обозначения освещенности используют букву I, начальную букву английского словосочетания Incident light (падающий свет). Освещенность измеряется в люксах (lux), сокращенно - лк. Для образного представления обычно приводится такой пример: в темной

[1] *Не следует путать экспозицию — количество света, и выдержку — время экспонирования.*

комнате свеча на расстоянии 1 метра создает освещенность в 1 люкс. По санитарным нормам освещенность в помещении, где работают люди, должна быть не менее 100 люкс (на уровне поверхности стола). Производительность различных видов труда заметно повышается, если увеличивать освещенность до 300 и даже 500 люксов. Это тот уровень, к которому обычно стремятся, рассчитывая количество ламп для освещения рабочего помещения на фабриках или в офисах. Если на видеокамере VHS имеется обозначение 0,8 Lx, то это означает, что камера может снимать при очень низком уровне освещенности, например, при свете одной свечи.

Экспозиция (Н) определяется как произведение освещенности на время экспонирования. Чтобы выяснить величины экспозиций, с которыми фотограф сталкивается на практике, проведем мысленный эксперимент. Возьмем в темноте лист фотобумаги и на 2 секунды включим в комнате верхний свет. Мы знаем ориентировочно уровень освещенности в комнате, около 100 люкс. За 2 секунды фотобумага получит экспозицию:

$$H = 100 \text{ лк} \bullet 2 \text{ с} = 200 \text{ лк}\bullet\text{с (люкс-секунд)}$$

Нетрудно догадаться, что такие и даже большие экспозиции получают только позитивные материалы под фотоувеличителем.

Когда же мы в комнате производим фотосъемку через объектив фотоаппарата, количество света, которое получает пленка, резко уменьшается. Даже если наш объектив имеет светосилу 1,4, световой поток уменьшается в 8 раз, по сравнению с тем количеством света, которое могло бы попасть на пленку, не будь объектива. При диафрагме 2 освещенность на пленке составит всего 6% от освещенности на объекте. И если освещенность в комнате на уровне столе около 100 лк, то при диафрагме 2, освещенность на пленке составит 6% от 100, т.е. 6 лк, а количество света, которое получит пленка (Нпл) при выдержке, например, 1/30 сек составит:

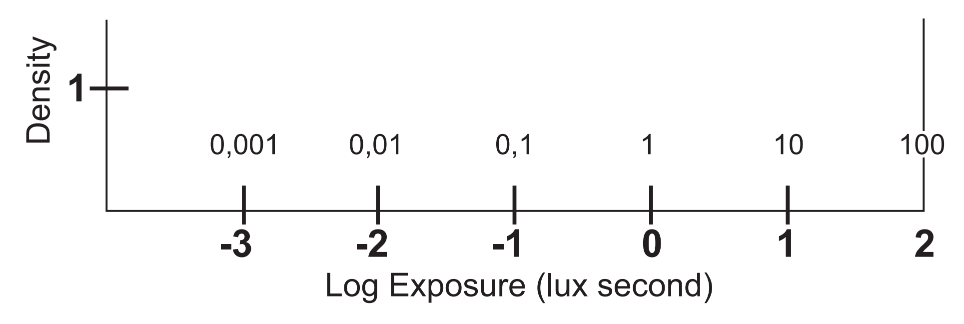
$$H_{пл} = E_{пл} \cdot t = 6 \cdot 1/30 = 0{,}2 \text{ (лк·с)}$$

Если же учесть, что в объектив попадает свет, отраженный от предметов, то легко понять, что экспозиции, которые на практике получает негативная фотопленка, в численном значении оказываются значительно меньше единицы. Так, средне-серое поле с коэффициентом отражения 0,18 при тех же условиях съемки создаст экспозицию

$$H_{пл} = E_{пл} \cdot t \cdot \rho = 6 \cdot 1/30 \cdot 0{,}18 = 0{,}036 \text{ (лк·с)}$$

Когда вы откроете рекламный буклет фотопленки «Кодак», то обязательно найдете там характеристические кривые. Однако горизонтальная шкала под характеристической кривой не будет обозначена буквой Н. Слово «экспозиция» в английском языке начинается с буквы «Е» (Exposure), именно этой буквой и будет обозначена экспозиция. А поскольку для освещенности используют букву I, то знакомая нам формула **H = E · t** в зарубежном исполнении приобретает вид: **E = I · t**.

Иностранные фирмы на бланках чаще всего приводят шкалу экспозиций в виде десятичных логарифмов значений экспозиций с обозначением **lgE** или **lg I · t**. Прочитать такую шкалу довольно просто. Число «2» на логарифмической шкале означает 10^2 = 100 лк · с, число «-2» следует понимать как $1/10^2$ = 0,01 лк.с *(см. рисунок)*.



Горизонтальная шкала сенситометрического бланка – ось экспозиций. Нижняя часть шкалы взята с проспекта фотопленки Кодак, верхняя часть добавлена нами.

Глава II

КАК ПОЛУЧАЕТСЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ КРИВАЯ

После экспонирования и последующего проявления сенситограммы необходимо измерить плотность, степень потемнения каждого поля в негативе. Поскольку слово плотность пишется по-английски как «Density», рядом с вертикальной шкалой сенситометрического бланка, на которой откладываются значения плотностей, расположена большая буква D, первая буква этого слова.

С такими единицами, как метр, килограмм, мы постоянно сталкиваемся в обиходе, и поэтому нам легко их представить. Представить единицу плотности тоже несложно. За единицу плотности принята такая «степень непрозрачности», которая ослабляет поток света в 10 раз. Если серый фильтр ослабляет количество проходящего через него света в 10 раз, то его плотность будет равна единице.

Если мы сложим вместе два серых фильтра, каждый из которых имеет плотность D = 1, то в результате получим плотность, равную 2. Один фильтр ослабляет световой поток в 10 раз, т. е. пропускает 1/10 часть светового потока, другой фильтр, уменьшая свет в 10 раз, пропускает также 1/10 часть, но от света, прошедшего через первый фильтр. Следовательно, фильтр с плотностью D = 2 пропустит всего 1/100 часть светового потока.

Соответственно плотность D = 3 можно представить в виде трех сложенных вместе светофильтров, каждый из которых уменьшает свет в 10 раз или в виде одного светофильтра, который ослабляет световой поток в 1000 раз.

Вы заметили соответствие? Вместо того чтобы обозначать непрозрачность, как степень ослабления потока света, в «количествах раз», используют не само значение (10 раз, 100 раз, 1000 раз), а, как это часто бывает в технике, его логарифмический эквивалент (1, 2, 3), поскольку $10 = 10^1$, $100 = 10^2$, $1000 = 10^3$.

Для промера плотностей разработаны специальные приборы — денситометры (рисунок). Они показывают значения в виде десятичного логарифма. В научно-технической литературе после численного значения

2 Единицы логарифмической величины безразмерного отношения называются Белами, от имени американского изобретателя телефона А.Г.Белла (A.G.Bell, 1847 - 1922).





Денситометр «Макбет TD-504»

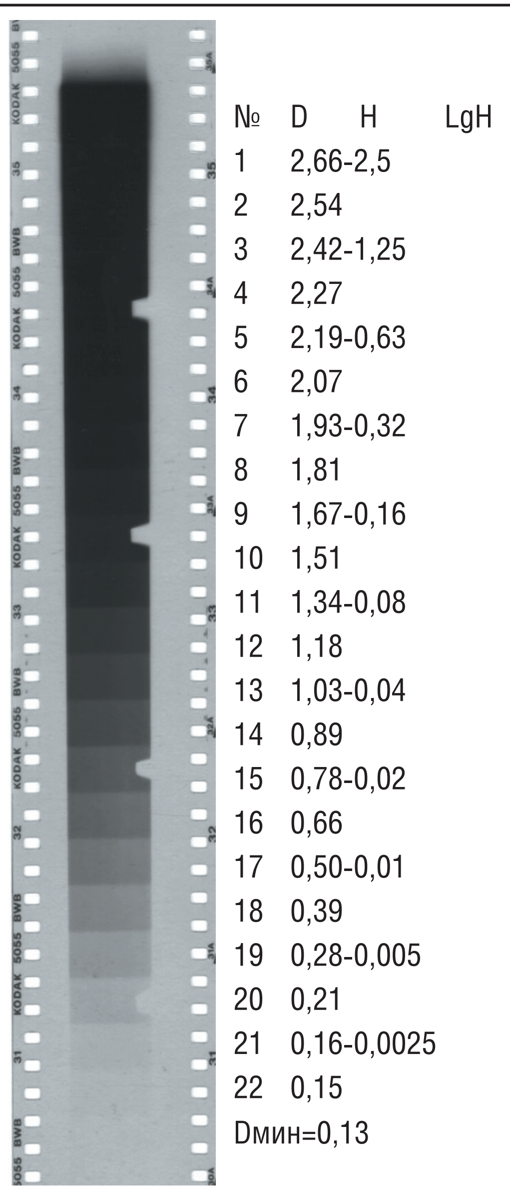
обычно пишется буква «Б», например, плотность 2 Б, что подразумевает плотность в 2 Бела[2] . Для фильтров, которые уменьшают свет меньше, чем в 10 раз, значения плотностей будут меньше единицы. Так, двукратный фильтр будет иметь плотность 0,3, поскольку lg 2 = 0,3.

Если на денситометре промерить 4х-кратный нейтральный фильтр, то, если этот фильтр действительно 4-кратный, денситометр покажет значение 0,6, поскольку денситометр показывает логарифм пропускания, а lg 4 = 0,6.

Начало изучению соотношений между экспо¬зицией и образующимся почернением светочувствительного слоя положили Хертер и Дриффилд в 1892 году. Они показали, что это соотношение графически может быть изображено в виде «характеристической кривой», если по горизонтальной оси откладывать логарифмы освещений, а по вертикальной оси — соответствующие им значения почернений.

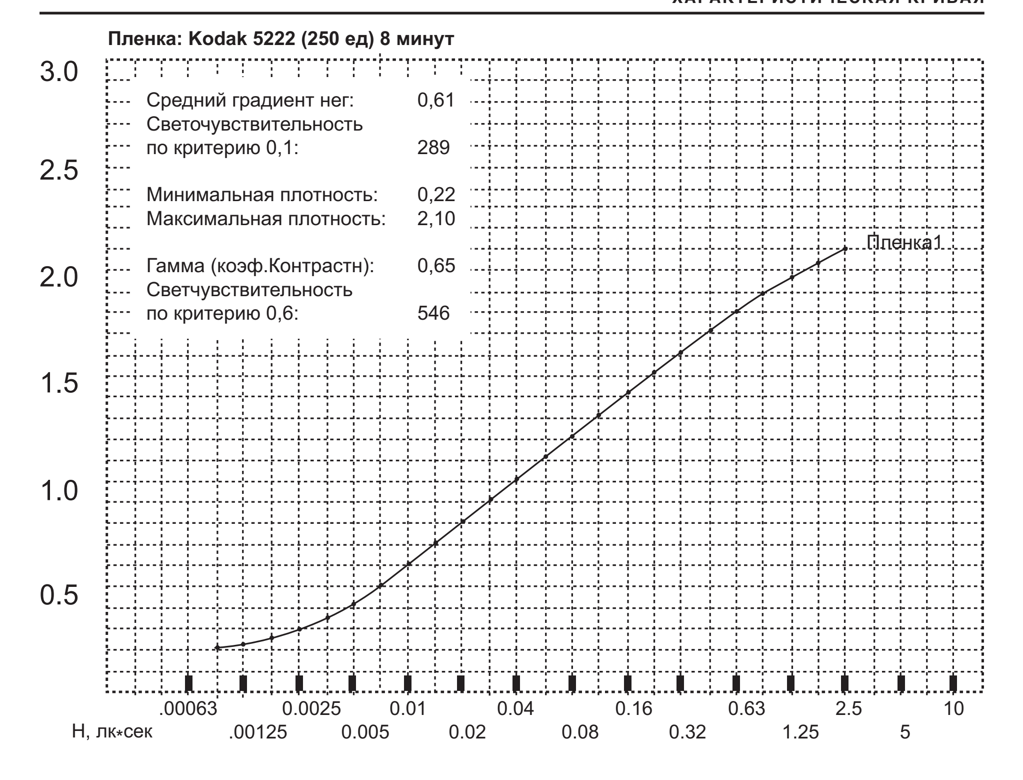
Характеристическая кривая строится по промерам полей сенситограммы. По горизонтальной шкале последовательно отмечается экспозиция — количество света, которое получает каждое поле сенситограммы в приборе сенситометре, а по вертикальной оси — плотность, — ответ фотопленки на данное количество света. Самую большую экспозицию получает первое поле, и экспозиция первого поля вместе с номером соответствующего серого или цветного фильтра, через который производится экспонирование, вписывается в паспорт сенситометра. Фотопленки средней чувствительности экспонируются так, что первое поле получает обычно от 2,5 до 5 лк·с. Экспозиции каждого последующего поля убывают в прогрессии со знаменателем $\sqrt{2} \approx 1,4$ (или, что то же самое, в 2 раза через одно поле) и поэтому легко рассчитываются. На сенситометрическом бланке каждому полю соответствует своя вертикальная линия. Чем большее количество света получает негативная или позитивная пленка, тем большая на фотоматериале образуется плотность, маленькие количества света вызывают выход малых плотностей. Полученный ряд точек соединяется плавной линией. Таким образом получается характеристическая кривая.

Следующий рисунок представляет собой реальную сенситограмму кинопленки Кодак 5222 со значениями плотностей, которые получены после промера сенситограммы на денситометре (см.табл.). Ниже приведена характеристическая кривая, построенная по данным плотностям.



№ поля	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Плотность D, Бел	2,10	2,03	1,95	1,87	1,79	1,69	1,60	1,52	1,42	1,32	1,20	1,11

№ поля	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	$D_{мин}$
Плотность D, Бел	1,01	0,91	0,81	0,71	0,61	0,51	0,43	0,36	0,30	0,26	0,23	0,22



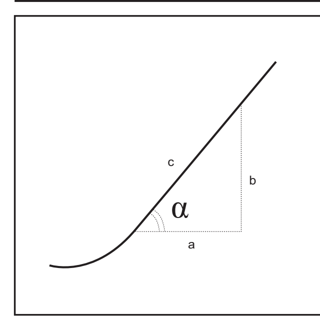
Глава III
КАК ПО ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КОЭФФИЦИЕНТ КОНТРАСТНОСТИ

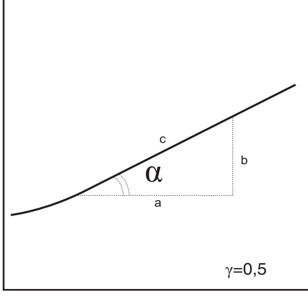
Для обозначения коэффициента контрастности (степени контрастности) в сенситометрии используется специальный символ— греческая буква гамма — γ. Гамма показывает степень наклона характеристической кривой и определяется как тангенс угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой.

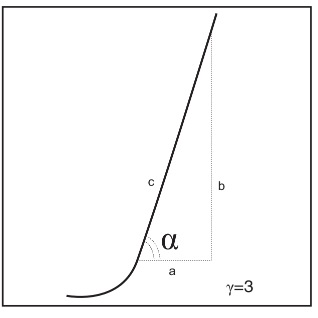
Чтобы представить, какие численные значения может приобретать степень контрастности, гамма, и как визуально значение гаммы связано с наклоном характеристической кривой, необходимо вспомнить основы тригонометрии. Чтобы в прямоугольном треугольнике, на одной из сторон которого лежит характеристическая кривая, найти тангенс угла, необходимо катет противолежащий b разделить на катет прилежащий, a (см. рисунок).

Так, если сторона b в прямоугольном треугольнике равна стороне a, образуется угол равный 45°, отношение длин катетов становится равным единице. Из этого следует, что если пленка имеет коэффициент контрастности, равный единице, ее характеристическая кривая идет под углом 45°.

Если же сторона b больше, чем сторона a, то характеристическая кривая, лежащая на гипотенузе такого треугольника, будет иметь угол наклона больше 45° и соответственно гамму больше единицы. Если же в прямоугольном треугольнике сторона b меньше стороны a, гамма оказывается меньше единицы.







Характеристические кривые с разными коэффициентами контрастности (гамма 1, 0,5 и 3)

Если гамма меньше единицы, то это означает, что прирост плотностей идет с меньшей скоростью, чем прирост экспозиций. Мы сильно меняем экспозицию (берем большой интервал яркостей — ярко освещенный объект с глубокими тенями), интервал a, а прирост плотностей в материале – интервал b - мало заметен. Это характерно для негативных фотопленок.

Гамма характеризует то, с какой скоростью происходит рост плотностей. Если гамма фотобумаги равна 2, то это означает, любая разница плотностей в негативе станет на фотобумаге в 2 раза больше.
Рекомендуемая степени контрастности для черно-белых негативных фотоматериалов, гамма, в настоящее время составляет 0,65. Несколько лет назад негативы рекомендовалось проявлять до более высокого коэффициента контрастности, до 0,8.

Глава IV
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ КРИВАЯ И ИНТЕРВАЛ РАБОЧИХ ПЛОТНОСТЕЙ

Благодаря низкой степени контрастности, на негативной пленке удается зафиксировать очень большой интервал яркостей. Если во время съемки один объект будет отличаться по яркости от другого в 1000 раз, т.е. на 10 каналов[3] экспонометра (например, темный предмет в неосвещенном подъезде и белая, освещенная солнцем, рубашка человека, который стоит у подъезда), то на негативной пленке могут быть переданы все градации яркостей от тени внутри подъезда до самого ярчайшего светового пятна на светлой рубашке. Более того, негативная пленка способна передать еще больший интервал яркостей, вплоть до солнечного блика в стекле. Причем большей яркости будет соответствовать соответственно большая плотность в негативе. Например, в зимнем пейзаже солнечный диск в негативе будет иметь значительно большую плотность, чем белый снег. Почти всегда негативная пленка способна разные яркости, сколь большими они ни были, передать разными плотностями.

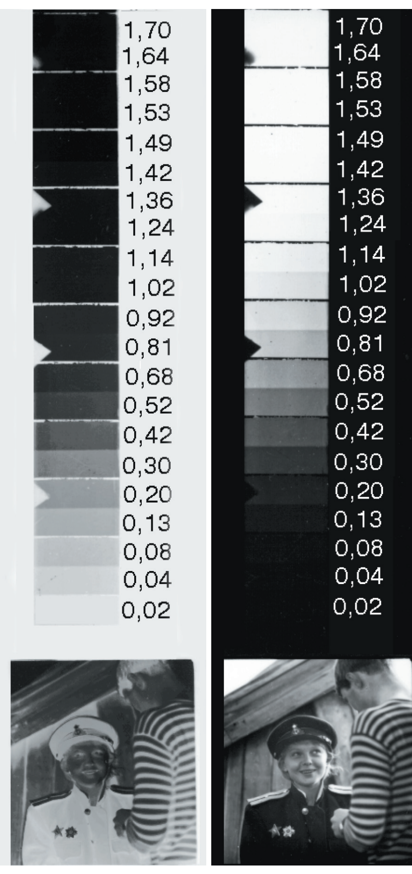
Однако из практики известно, что яркие блики на снегу, на воде, диск солнца (если это не восход и не закат) получаются на фотографиях просто белыми, без проработки. В негативе мы видим детали, как в тенях, так и в освещенных местах, а на фотобумаге детали в светах не пропеча-

[3] *10 каналов соответствуют изменению экспозиции в 210 = 1024 раза*

тываются. **Не все плотности негатива, хотя визуально они различимы в негативе, пропечатываются в позитиве.**

Отпечатав на один лист фотобумаги нормального контраста контактным способом сенситограмму вместе с негативным изображением, которое мы считаем нормальным по плотностям, увидим, что при оптимальных условиях печати пропечатывается менее половины полей сенситограммы (рисунок).

Первые, самые плотные, поля сенситограммы на фотобумаге получаются одинаково белыми. Плотности негативного изображения выше 1,20 над Dмин оказываются непроработанными в позитиве.



Негатив с сенситограммой, отпечатанные на позитив нормального контраста.

На самой негативной пленке мы можем получить очень высокие плотности — выше D = 3,0 над вуалью. Но воспользоваться такими плотностями невозможно. Мы можем отчетливо видеть в негативе облака, но если их плотность отличается от плотности основы и вуали более чем на 1,20, то в позитиве они будут отсутствовать.

В негативе мы можем видеть пейзаж за окном интерьера, но если он ярко освещен (например, выход из кафе на светлую улицу), пейзаж и улица выбелятся, и на фотоотпечатке мы не различим того, что находится за окном. Когда в кадр попадают светящиеся люстры или просто открытые лампы накаливания, то в негативе отчетливо видны не только колбы ламп, но даже и раскаленные спирали. А на фотоотпечатке вместо ламп оказываются белые туманные круги-пятна, без всяких деталей.

На фотоотпечатке сенситограммы видно, что пропадают детали не только в светах, но и в тенях. Например, поля с плотностями 0,02, 0,04 и 0,08 (над $D_{мин}$) совершенно сливаются с темным фоном.

Еще в начале века Е.Гольдберг после денситометрического анализа большого количества негативов и отпечатанных с них фотографий пришел к выводу (1918 г.), что плотности в негативе ниже 0,10 над вуалью не имеют существенного значения для изображения. Эту точку, 0,10 над вуалью, Гольдберг предложил называть эффективным порогом, именно с этой плотности при оптимальных условиях печати начинается проработка в тенях.

Считается, что в оптимальном по плотностям негативе черное поле на серой шкале с коэффициентом отражения около 2%, которое имеет такой же коэффициент отражения, что и черное сукно (черная ткань, черная шляпа, черный пиджак, но не черный бархат), должно иметь плотность

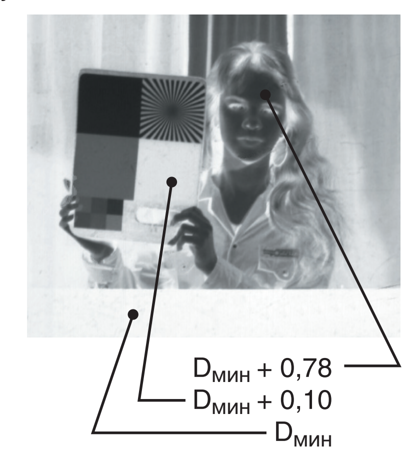
0,10-0,20 Б (т.е. отличаться от плотности вуали на 0,10-0,20). Эти значения обычно рекомендуются как ориентиры для оптимального по плотности негатива (см. табл.).

черное поле (2-3%)	0,10-0,20 Б
серое поле (18%)	0,60-0,70 Б
белое поле (80%)	1,10-1,20 Б

Таблица № 3. Рекомендуемые плотности серой шкалы в оптимальном негативе (без учета плотности основы и вуали)

В выбранном нами негативе черное поле серой шкалы имеет плотность 0,10 Б над вуалью, серое поле с коэффициентом отражения 18% - 0,66 Б, освещенная сторона лица девушки - 0,78 Б, а белое поле - 1,12 Б.





Выбор оптимального негатива

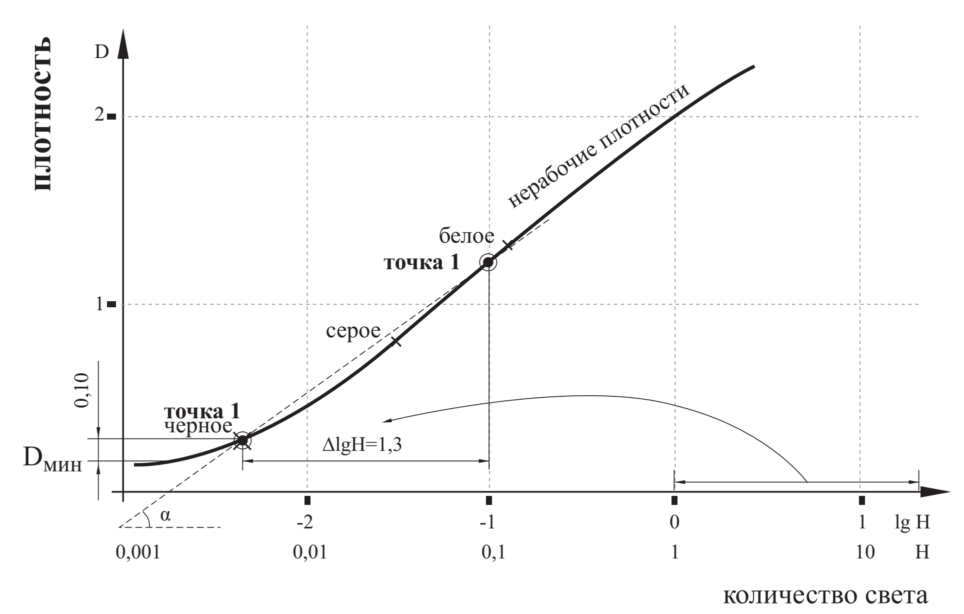
Если мы расположим эти плотности на характеристической кривой, то увидим, что интервал плотностей негатива, принимающих участие в построении позитивного изображения, расположен, в основном, в нижней половине характеристической кривой.

Поэтому когда встает вопрос об определении степени контрастности пленки, имеющей два прямолинейных участка (в верху и в низу кривой), он однозначно решается в пользу нижней половины характеристической кривой.

Чтобы избежать разногласий в этом вопросе, был предложен конкретный участок для определения степени контрастности. Степень контрастности, найденная на этом участке, называется средним градиентом. Этот участок, как правило, находится внутри интервала рабочих плотностей и ограничен двумя точками. Первая из этих точек — точка на характеристической кривой, где располагается черный объект с проработкой деталей: $D_{мин}$ + 0,10.

Вторая точка, которая определяет интервал для нахождения среднего градиента, выбрана там, где на характеристической кривой располагаются светлые объекты. Коэффициент отражения второй фиксированной точки должен быть в 20 раз больше, чем коэффициент отражения, соответствующий первой точке, т.е. должен быть около 40-50%. Таким образом для определения среднего градиента выбран участок характеристической кривой, ограниченный двумя точками, которые в нормально экспониро-

ванном негативе соответствуют черному объекту в проработке и светлому объекту с деталями. Поскольку число 20 в логарифмическом виде записывается как 1,3, то механизм нахождения среднего градиента выглядит так, как показано на рисунке.



Способ нахождения среднего градиента.

Вначале на характеристической кривой находится плотность, отличающаяся от минимальной на 0,10 Б. Затем от этой точки откладывается интервал, соответствующий 1,3 lgH и вверх проводится прямая до пересечения с характеристической кривой. Так определяется вторая точка. Эти две точки на характеристической кривой находятся с единственной целью — они ограничивают интервал, на котором определяется средний градиент. Точки между собой соединяются прямой линией. Тангенс угла наклона этой линии и будет являться средним градиентом. Угол наклона этой линии несколько меньше, чем угол наклона прямолинейного участка характеристической кривой, а это означает, что значение среднего градиента численно будет несколько ниже, чем значение гаммы.

Аналитически средний градиент находится по формуле:

$$\bar{g} = \frac{\Delta D}{\Delta \lg H}$$

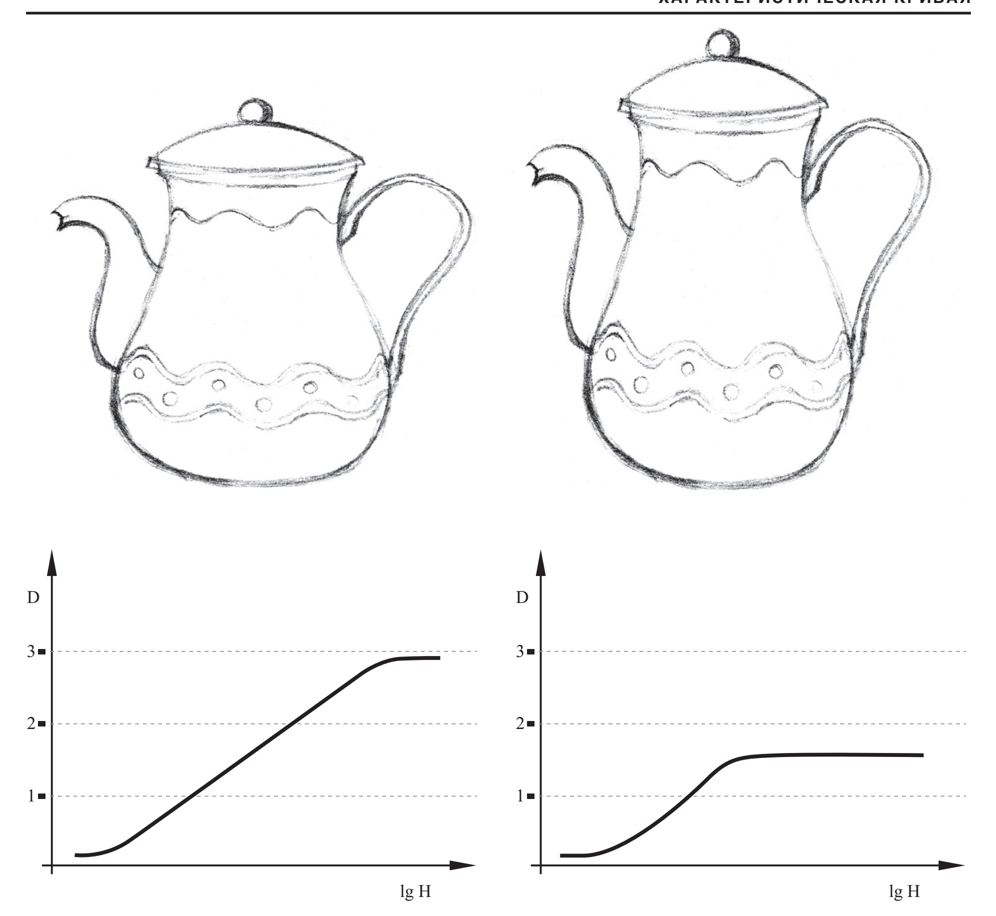
где D - разница плотностей между точками 1 и 2, а lgH - заданный интервал экспозиций, равный 1,3.

Средний градиент почти полностью вытеснил из употребления гамму, хотя, в принципе, это один и тот же коэффициент контрастности. Чаще всего первая точка для определения среднего градиента не лежит на прямолинейном участке, а попадает на начальный загиб кривой, и поэтому значение среднего градиента в численном выражении оказывается несколько меньше гаммы, или иногда — равным гамме: это когда первая точка попадает уже на прямолинейный участок, что встречается редко. И тогда нет никакой разницы, чем пользоваться — и гамма, и средний градиент — и численно и по сути дела одно и то же.

Глава V
КАК ПО ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПЕРЕДАВАЕМЫЙ ИНТЕРВАЛ ЯРКОСТЕЙ (ШИРОТА)

Интервал яркостей объекта, от черного до белого, который в негативно-позитивном процессе передается с проработкой деталей, принято называть передаваемым интервалом яркостей. Очевидно, что этот передаваемый интервал яркостей зависит не столько от негативной пленки, сколько от фотобумаги. Ведь негативная пленка может передать интервал и 1:2000, он передастся в негативе довольно большим интервалом плотностей. Но на позитив такой интервал плотностей негатива «не пропечатается». Того количества света, которое будет проходить через высокие плотности негатива (как, например, 1,5, 2,0 или 2,5), просто недостаточно для того, чтобы вызвать в позитиве хоть какое-то почернение. Максимальный интервал плотностей негатива, который может быть пропечатан на позитив нормальной контрастности, и который может быть использован фотографом, как правило, не превышает 1,10-1,20. Почти всегда фотографы хотят, чтобы прямолинейный участок характеристической кривой негативной фотопленки был как можно длиннее (он может в случае контрастно обра-ботанных пленок подниматься до плотности D=3). Однако интервал рабочих плотностей негатива занимает менее половины характеристической кривой и в нормально экспонированном негативе максимально пропечатываемая плотность не превышает D=1,20 над вуалью. Даже в случае плотных негативов вряд ли есть смысл использовать плотности выше 1,50-1,60. При такой плотности фактура полностью теряется и увеличение выдержки при печати приводит лишь к появлению серого оттенка в светлых местах позитива, но не к появлению деталей. Потенциально в негативной фотопленке заложена возможность получать очень высокие плотности. Например, на засвеченном кончике пленки плотность может быть около 3. Однако на построение негативного изображения в среднем идет 15-20% светочувствительных солей серебра, имеющихся в эмульсии, остальные 80% солей серебра уходят в фиксаж.

С практической точки зрения совершенно равнозначны две фотопленки, чьи характеристические кривые изображены на рисунке 5, как равнозначны по вместимости два чайника, изображенные рядом.



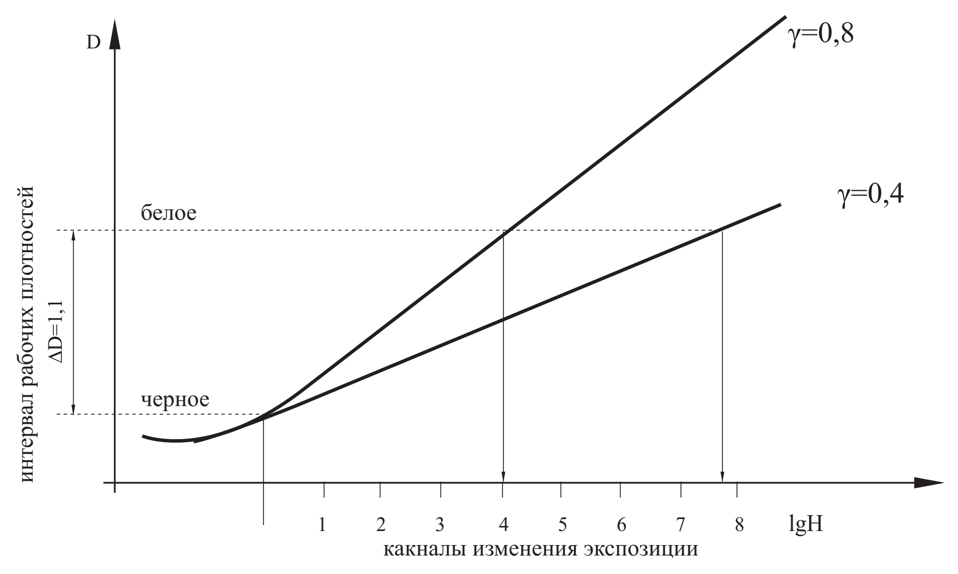
Два чайника и две характеристические кривые.

Как бы мы ни старались, в стандартном фотопроцессе мы сможем передать только такой интервал яркостей объекта, который укладывается в негативе в интервал плотностей 1,10 - 1,20.

Фотографа при съемке волнует не столько интервал плотностей негатива, сколько интервал яркостей объекта, который может быть передан в конечном позитивном изображении. Желая определить максимальный интервал яркостей, который может передать негативно-позитивная пара, мы должны определить то, какой перепад яркостей создает в негативе разницу плотностей 1,10.

Учитывая, что малые плотности, как правило, запечатываются, для первых следов плотностей негатива, нужных для построении изображения в тенях, следует взять точку 0,10 над $D_{мин}$. И тогда рабочие плотности негатива будут располагаться в интервале плотностей от 0,10 (черное в позитиве) до 1,10 (белое в позитиве).

Передаваемый интервал яркостей тесно связан с контрастностью негативного материала. Количество каналов от черного до белого, передаваемых фотопленкой, не зависит от производителя светочувствительного материала, но зависит исключительно от коэффициента контрастности.



Зависимость интервала передаваемых яркостей от черного до белого (так называемой «широты») от степени контрастности негатива.

Для определения передаваемого интервала яркостей (Δ B) в каналах экспонометра для разноконтрастно проявленных негативов можно предложить формулу (вывод этой формулы мы не приводим):

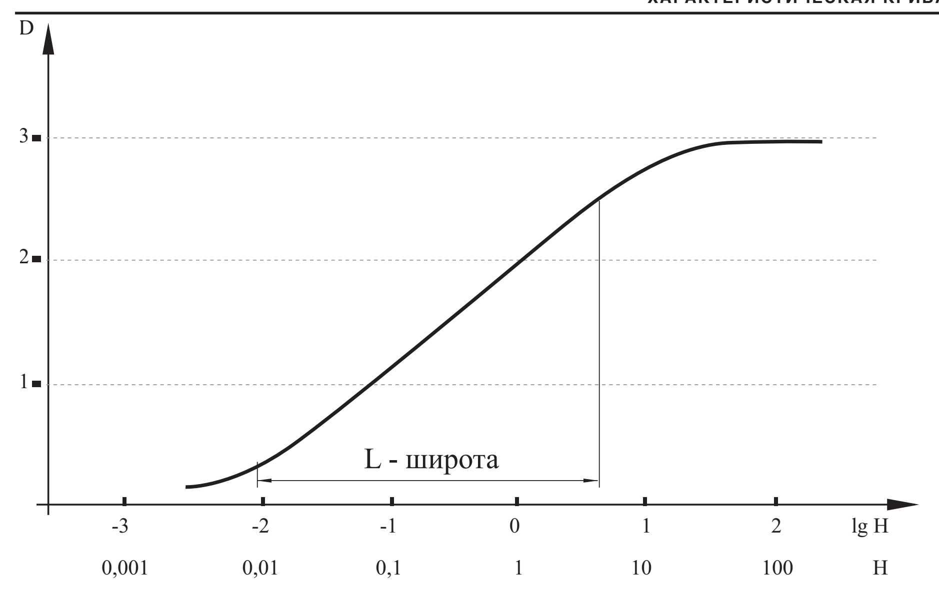
$$\Delta B = 3{,}3 / \gamma$$

Чтобы найти передаваемый интервал яркостей (от черного с проработкой в тенях до белого с проработкой в светах) следует число 3,3 разделить на степень контрастности негативного материала.

Так, при низкой гамме негатива, около 0,40, пропечатываемому на позитив интервалу плотностей (ΔD=1,10) будет соответствовать интервал яркостей, охватывающий около 8 каналов (см. рисунок), гамме негатива около 0,50 будет соответствовать интервал яркостей более 6 каналов, а при степени контрастности γ=0,80 передаваемый интервал яркостей уменьшится до 4 каналов. Мы приходим к известному выводу, что чем выше степень контрастности негатива, тем меньше широта передаваемого интервала яркостей.

Этот интервал от черного до белого почти всегда называют широтой. Однако мы умышленно пока не пользуемся этим термином, поскольку под «широтой» в академической литературе понимается несколько другая, в численном выражении значительно большая величина — проекция прямолинейного участка характеристической кривой на ось lg экспозиций.

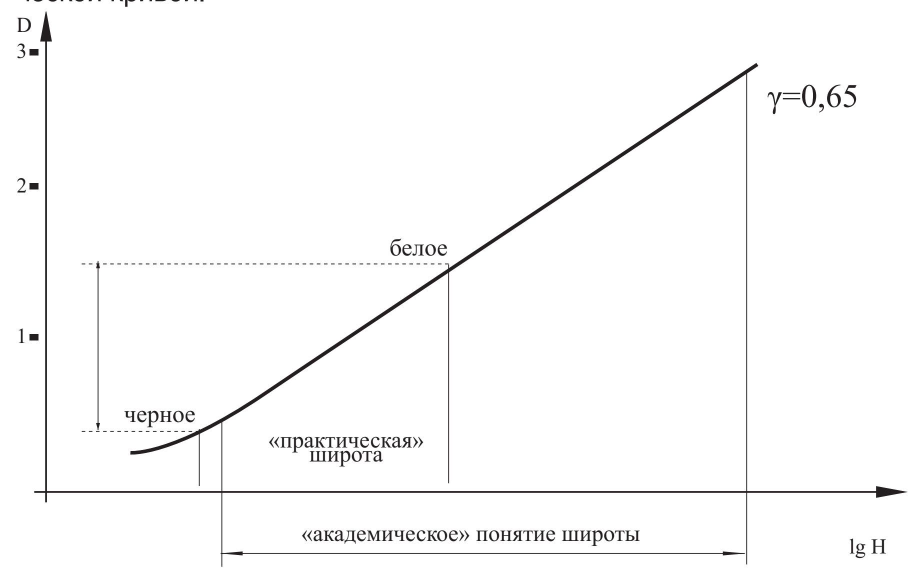
Так, согласно «академическому» определению, «фотографическая широта» реальной фотопленки KODAK T-MAX, характеристическая кривая которой приведена на рисунке 6, должна составлять в логарифмических единицах 2,6 (1: 450). В этом интервале обеспечивается пропорциональная передача яркостей (большей яркости соответствует пропорционально большая плотность), однако передаваемый интервал яркостей, на который, собственно говоря, и рассчитывает фотограф, равен всего-навсего



Характеристическая кривая фотопленки Кодак Ти-макс

1,4 или в арифметическом выражении 1:30, поскольку только соответствующая этому интервалу экспозиций часть плотностей характеристической кривой сможет пропечататься в позитиве.

Следует заметить, что в ГОСТе фигурирует только одно определение «фотографической широты» — проекция всего прямолинейного участка: фотографическая широта соответствует интервалу экспозиций, ограниченному точками конца и начала прямолинейного участка характеристической кривой.

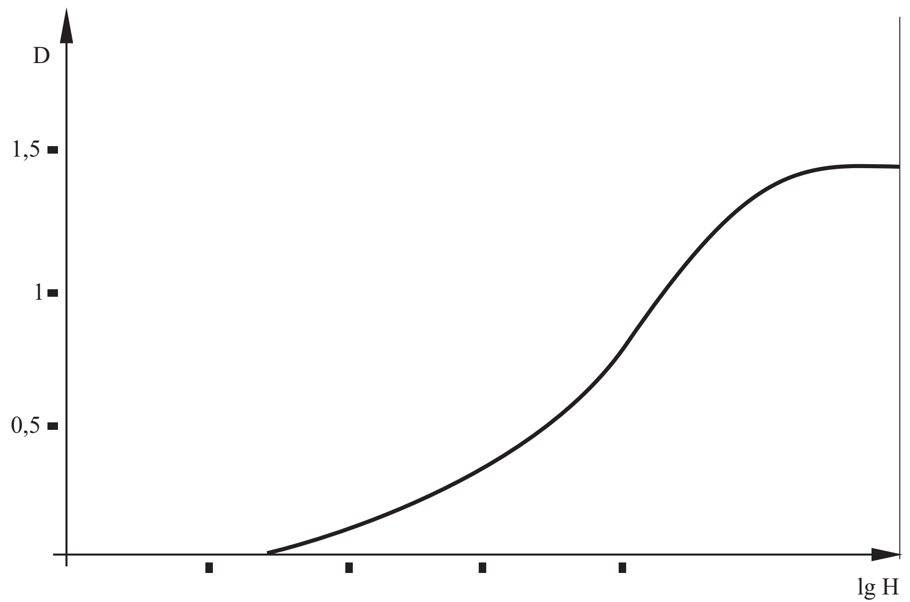


«Академическая» и «практическая» широта.

В большинстве случаев под термином «широта» фотографы понимают передаваемый интервал яркостей, а не то, что вообще может пропорционально зафиксировать негатив. Поэтому в отличие от «академической» фотографической широты, которая фотографу, возможно, пока ни о чем не говорит, мы будем пользоваться понятием «широта» с уточняющим словом «практическая», чтобы тем самым сказать, что речь идет о передаваемом на практике интервале яркостей от черного до белого (см. рисунок).

Негатив, обработанный до нормального (рекомендуемого) коэффициента контрастности (0,65) и напечатанный на нормальную по контрастности фотобумагу всегда будет передавать один и тот же интервал яркостей от белого до черного, примерно 5 каналов (1:32). Поэтому к фразам из рекламных проспектов о том, что данная негативная пленка имеет большую, чем у других пленок, фотографическую широту, с практической точки зрения следует относиться так же, как и к рекламным фразам, что «наш шоколад стал еще шоколаднее». При одной и той же степени контрастности все негативные пленки имеют практически одну и ту же широту. Большая широта может получаться на любой фотопленке только при меньшем коэффициенте контрастности.

Честно говоря, то, что для «академического» определения широты выбран прямолинейный участок, для практики не имеет никакого значения. В течение десятков лет многие фабрики, производящие черно-белую кинофотопленку, в силу особых соображений придавали или старались придать кривым своих материалов вогнутую форму, не имеющую совершенно прямолинейного участка. В нижней части характеристическая кривая имела пологий участок, что улучшало проработку теней. Такие кривые носят название «кривых с постоянно возрастающим градиентом» и с академической точки зрения их широта не поддается замеру (близка к нулю), в то время как передаваемый интервал яркостей (названный нами «практическая широта») легко рассчитывается вышеописанным способом.



Кривая с изменяющимся градиентом

Глава VI
КАК МЕНЯЕТСЯ ВИД ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ОТ ВРЕМЕНИ ПРОЯВЛЕНИЯ

Увеличение времени проявления негатива увеличивает контрастность — это хорошо известно любому фотографу из практики, это хорошо видно и по характеристическим кривым — при изменении времени проявления меняется степень наклона характеристической кривой.

Первый негатив (пленка Кодак Ти-макс 100) проявлен до среднего градиента 0,5 (4 минуты в проявителе Д-76, экспонировано как 12 единиц), второй негатив — до среднего градиента 0,9 (12 минут в Д-76, экспонировано как 100 единиц).

Рисунок. Две характеристические кривые, полученные промером сенситограмм на разное время проявления. Внешний вид сенситограммы на негативной фотопленке Кодак Ти-макс с указанием плотностей. (Сенситометр ЦС-3)

Одному и тому же перепаду яркостей на лице человека будет соответствовать при разном времени проявления разный перепад плотности. При большем времени проявления перепад плотностей в негативе будет заметнее, лицо будет восприниматься контрастнее освещенным. При меньшем времени проявления перепад плотностей будет не столь заметным, изображение по контрасту будет мягче, пластичнее.

В нашем объекте перепад между освещенной и неосвещенной стороной лица составлял 2 канала (показания экспонометра: освещенная часть лица — 7 1/3 EV, теневая часть лица — 5 1/3 EV). Перепад между самым ярким объектом (освещенная часть вазы) и самым темным (стена на фоне) составлял 6 каналов (8 2/3 и 2 2/3).

* * *

Продолжение будет посвящено обсуждению способов определения по характеристической кривой светочувствительности — а их за столетнюю историю Х.К. предложено множество.

СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Для фотографа наибольший практический интерес представляет выбор точного индекса светочувствительности и времени проявления пленки.

Изменяя время проявления, можно добиться большей или меньшей контрастности нега-тивного изображения. Однако в большинстве случаев выбор того или иного времени прояв-ления продиктован не столько желаемой степенью контрастности (почти любую контраст-ность негатива можно «уравновесить» подбором соответствующего типа фотобумаги), сколько стремлением выйти на определенную заданную светочувствительность. Учитывая, что фотографу приходится снимать в разных световых условиях, когда от пленки требуется то быть минимально чувствительной, то наоборот, показать себя способной реагировать на минимальное количество света, выбор правильного индекса светочувствительности приобретает огромное значение.

Глава VII
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

Чем большее количество света требуется сообщить негативной фотопленке для получения в конечном итоге качественной репродукции, тем меньше чувствительность пленки. Чем меньшее количество света обеспечивает в негативе прирост плотностей над вуалью, тем све-точувствительность выше. Поэтому в общем виде светочувствительность определяется как величина, обратная количеству света, необходимому для получения заданного ответа, задан-ного эффекта.

Этот эффект называется критерием светочувствительности. Слово «критерий» можно пе-ревести на русский язык как «мнение», «суждение». Поиски критерия — это поиски такой единственной точки, по которой можно составить представление обо всей пленке.

В разное время было предложено много различных критериев светочувствительности.

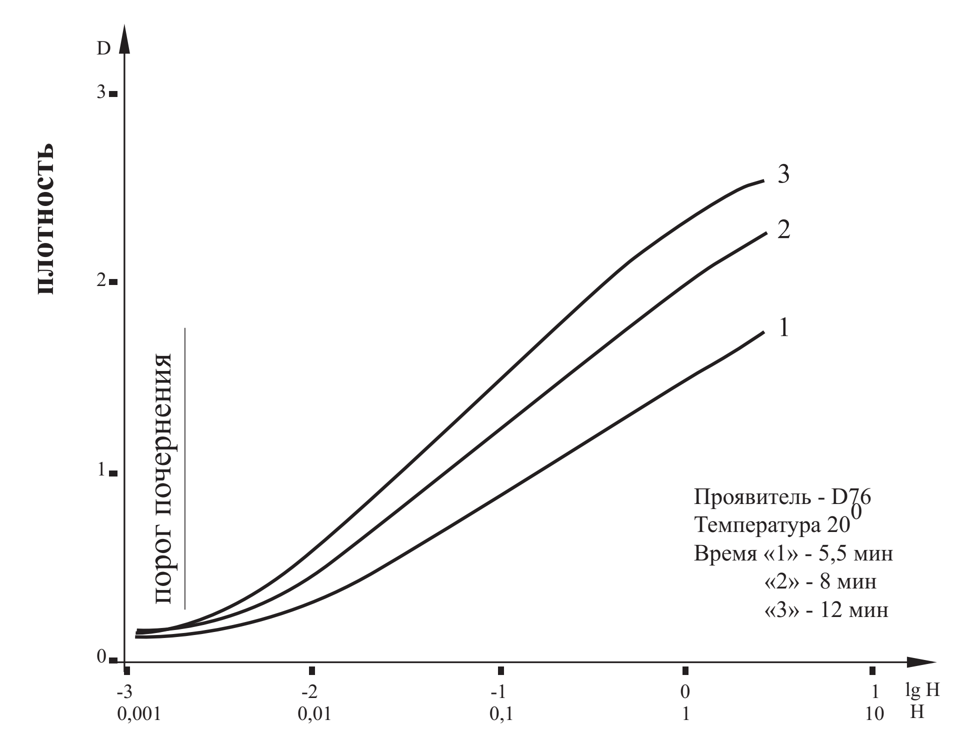
Первым по времени критерием был порог почернения. Некоторые исследователи предложили определять светочувствительность по тому количеству света, которое при проявлении вызывает в слое первые следы потемнений. Нахождение этого критерия не требует никаких измерений и производится визуально, что на заре развития сенситометрии, когда еще не существовали необходимые измерительные приборы, было очень ценно. Этот критерий долгое время имел широкое распространение, в частности он использовался в предложенном Л.В.Варнеке в середине 70-х гг. XIX века методе оценки светочувствительности, применявшемся в ряде стран.

По такому принципу определялась светочувствительность в системах Шайнера, Эдера, Винна и др. В системе Шайнера светочувствительность определялась номером того выреза в диске сенситометра, за которым после экспонирования и проявления начинаются едва заметные потемнения. По Эдеру, чувствительность оценивалась длиной полоски в миллиметрах, проработавшейся в негативе. «Градусы» Винна — это номер

последнего отверстия экрана сенситометра, под которым еще получается потемнение.

Попробуем применить этот критерий для оценки светочувствительности фотопленки «Академия 200», проявленной на три разных времени – 5,5 минут, 8 и 12 минут.

Как видно из ниже приведенного рисунка, применяя в качестве критерия светочувстви-тельности порог почернения, мы приходим к выводу, что изменение времени проявления с 5,5 до 12 минут никак не повлияло на светочувствительность — все три характеристические кривые, соответствующие разным временам проявления, в начальных участках совпадают



Определение светочувствительности по порогу почернения приводит к мысли, что светочувствительность с увеличением времени проявления практически не меняется.

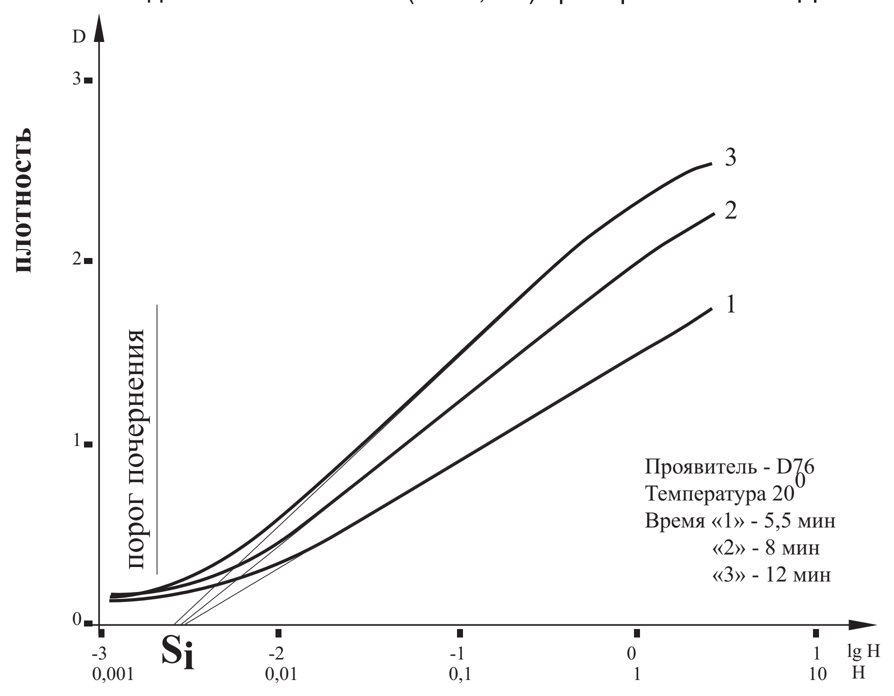
Метод определения светочувствительности по пороговой плотности может иметь значе-ние лишь в тех случаях, когда фотографическая съемка преследует цель регистрировать очень слабые яркости снимаемого объекта, например, звездного неба.

Когда в самом конце XIX века в результате работ Хертера и Дриффилда было введено представление о характеристической кривой, стали считать, что наиболее существенной ее частью является прямолинейный участок. Тогда за критерий светочувствительности была предложена точка инерции — точка пересечения продолжения прямолинейного участка с осью lgH. Это был второй по времени критерий светочувствительности. Эта точка инерции чаще всего остается постоянной при различных временах проявления (рисунок 3). Хертер и Дриффилд считали большим

достоинством то, что им удалось найти точку, которая не зависит от времени проявления и которая тем самым как бы выражает суть пленки. Из этого следовало, что светочувствительность не зависит от времени проявления.

Несмотря на несогласованность с практическими результатами, система Х. и Д. была первой системой, основанной на использовании характеристической кривой и получила широкое распространение: до 40-х гг. система Хёртера и Дриффилда была принята во многих странах. Так, в нашей стране от нее окончательно отказались только в 1954 году.

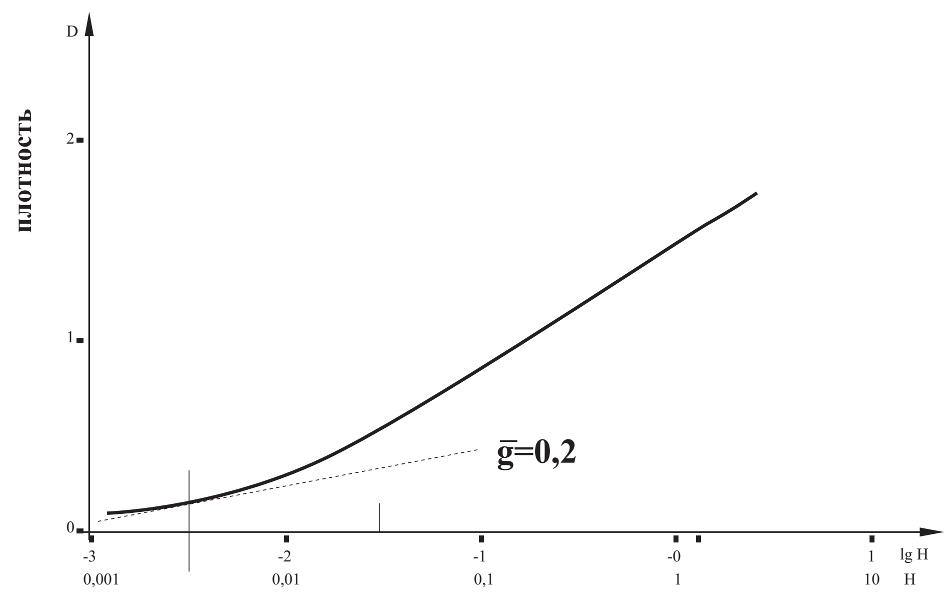
Чтобы получить численное значение чувствительности по этому методу, нужно число 34 разделить на экспозицию точки инерции. Поскольку линия инерции пересекает шкалу Н около значения 0,004 лк, светочувствительность фотопленки «Академия» оказывается (34 / 0,004) примерно 8 500^0 Х и Д.



Определение светочувствительности по точке инерции приводит к выводу, что светочувствительность при увеличении времени проявления более чем в 2 раза меняется настолько, что эту разницу невозможно выставить на экспонометре.

Свободные от недостатков системы Х.&Д. методы определения светочувствительности были предложены в Германии Гольдбергом и в Америке - Джонсом.

Л.Джонс в результате своих работ пришел к заключению, что светочувствительность практически начинается с той экспозиции, которой отвечает точка характеристической кри-вой, где контраст равен 0,2 или, другими словами, где касательная, проведенная к кривой, образует с горизонтальной осью графика угол с тангенсом 0,2 (угол около 11^0). Эту точку Джонс назвал точкой минимально полезного градиента плотности. Системой Джонса в 40-60 гг. XX века пользовались в Америке.



Определение светочувствительности по Джонсу — по минимально полезному градиенту плотности.

Как нетрудно видеть из рисунка, точка, найденная по минимально полезному градиенту, очень близка к известному нам критерию — порогу почернения. Светочувствительности, определенные «по Джонсу» обладают все теми же недостатками критерия «порога почерне-ния» — они, эти светочувствительности, численно почти не меняются при изменении времени проявления.

Этот критерий неудобен тем, что в практических условиях определение чувствительно-сти таким способом, требующим очень точного построения характеристической кривой, нахождение касательной к ней и определения тангенсов двух углов наклона (средний градиент и 0,3 * средний градиент), хлопотно и не очень надежно. Это побудило США отказаться от системы Джонса и с 1960 г. перейти на критерий ИСО.

Гольдберг, исследуя вопрос о передаче светочувствительными слоями световых деталей снимаемого объекта, на основании большого количества лабораторных исследований и практических съемок (1909-1918 гг.) пришел к выводу, что в построении негативов в тенях участвуют лишь те точки изображения, где плотность негатива превышает плотность вуали более чем на 0,1. Эту точку характеристической кривой Гольдберг и избрал для определения светочувствительности, назвав ее эффективным порогом.

Исходя из других соображений, в 1938 году Истоминым был предложен для аэрофото-графических материалов критерий 0,85 над вуалью. При такой плотности объекта в негативе наблюдалась наилучшая разрешающая способность. Светочувствительность аэрофотопленок (например, Тип-17, Тип-42), предназначенных для съемок с воздуха, до сих пор определяется по этому критерию. В течение многих лет с помощью этого критерия определялась светочувствительность также и черно-белых негативных кинофотопленок, и только сравнительно недавно, в начале 80-х

годов, в связи с переходом на стандарты ИСО, от него отказались. Поскольку плотность 0,85 в негативе имеет лицо, физический смысл данного критерия применительно к фотоматериалам может быть сформулирован следующим образом: держите всегда лицо в негативе плотностью 0,85 над вуалью независимо от контрастности негативного фотоматериала. Или другими словами - рассчитывайте светочувствительность негативного материала по тому количеству света, при котором лицо в негативе приобретает плотность 0,85 над вуалью.

Глава VIII
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО СТАНДАРТУ ISO

В первой половине XX века не было единой системы оценки светочувствительности фо-томатериалов. Почти каждая крупная страна, производящая фотографические материалы, имела свой, так называемый национальный сенситометрический стандарт или несколько та-ких взаимосвязанных стандартов. Среди всех этих систем наиболее распространены были немецкая система ДИН (1934 г.) и американская система АСА[1] (1947 г.).

Международной организацией по стандартизации (ИСО) были предприняты шаги к соз-данию такой новой международной системы сенситометрии, введение которой не потребовало бы от различных стран существенной ломки применяемых ими способов и методов определения светочувствительности и поэтому было бы для всех приемлемо.

Новый международный стандарт явился компромиссом трех систем: советской, немец-кой и американской, стремящимся объединить основные черты трех сенситометрических систем: ГОСТ, ДИН и АСА.

При разном времени проявления (то есть при разном среднем градиенте) светочувстви-тельность принимает разные значения. Чтобы присвоить фотопленке только одно значение светочувствительности, договорились об особом условии: средний градиент при этом дол-жен быть 0,62. Аналогию можно найти в физике: например, растворимость вещества в воде сильно зави-сит от температуры самой воды. Для удобства сравнения растворимостей разных веществ они даются при температуре 20 градусов Цельсия.

Поэтому, чтобы установить индекс светочувствительности испытуемой фотопленки, необходимо вначале определить, при каком времени проявления достигается средний градиент 0,62. И затем найти значение светочувствительности для данного времени про-явления.

1. Сначала следует найти критериальную плотность - Dкр, по которой определяется све-точувствительность. Для этого к минимальной плотности прибавляется приращение 0,10.

2. Из этой точки вертикально вниз проводится прямая, которая пересечет внизу бланка шкалу экспозиций Н.

3. По шкале “Н” определяем экспозицию, которая необходима для получения плотности Dкр = Dмин + 0,1. Подставляя это значение в формулу S=0,8/H, мы находим значение светочувствительности.

[1] *ASA, American Standart Association*

Средний градиент, до которого необходимо проявлять негативную фотопленку, фотограф выбирает сам, исходя из творческого замысла и предполагаемых условий съемки. Значение среднего градиента 0,62 выбрано лишь как условие, при котором следует сравнивать свето-чувствительности разных черно-белых фотопленок.

При градиенте 0,62 светочувствительность фотопленки Академия оказывается около 200 единиц, и это значение светочувствительности выставляется на упаковке.

	5,5 минут	8 минут	12 минут
Средний градиент	0,51	0,68	0,79
Светочувствительность по критерию 0,1	280	380	455
Светочувствительность по критерию 0,6	180	460	720

Проведя экспонометрические испытания фотопленки «ACADEMY 200» с использовани-ем проявителя D-76, мы рекомендуем для получения оптимальных негативов придерживать-ся данных, сведенных ниже в таблицу. Значения светочувствительностей округлены до стандартного ряда. Поскольку наши данные отличаются от рекомендованных фирмой-изготовителем, мы приводим их параллельно.

Время обработки в проявителе D-76 при 20° С, мин	Индекс светочувствительности по данным фирмы, ISO	Рекомендуемый нами индекс светочувствительности ISO или ед.ГОСТ
5,5	100	**160**
6	200	**250**
6,5	400	**320**
7,5	800	**400**
9	1600	**500**
10,5	3200	**640**

Индекс светочувствительности при разном времени проявления в зависимо-сти от способа определения светочувствительности

Несмотря на то, что критерий «0,1» принят при определении сенситометрической свето-чувствительности в качестве международного, данные, получаемые с его помощью, плохо согласовываются с практическими результатами, когда речь заходит о проявлении до разно-го коэффициента контрастности. Плохая корреляция с практикой объясняется тем, что эта критериальная точка — 0,1 над вуалью — находится в самом низу характеристической кри-вой, а все три характеристические кривые, как это видно из рисунка, в своей нижней части почти совпадают друг с другом. Автором данной статьи в 1988 году был предложен критерий 0,6 над вуалью.
Если оценить, во сколько раз изменилась светочувствительность при увеличении времени проявления с 5,5 до 10,5 минут (светочувствительность при 10,5 минутах проявления определялась по бланку кинетики проявле-

ния методом интерполяции, т.е. методом нахождения промежуточных значений, когда известны крайние), то согласно критерию 0,1, принятому для определения светочувствительности по сенситограмме, мы получим всего (410 : 180) 2,3 раза. Данные из прилагаемой инструкции к фотопленке — согласно этой информации при увеличении времени проявления с 7 до 10,5 минут светочувствительность фотопленки ACADEMY вырастает в 32 раза — со 100 ASA до 3200 ASA, что мало похоже на реальность.

Точку 0,10 над вуалью называют критериальной. Слово “критерий” можно перевести на русский язык как “мнение”, “суждение”.

Всего по одной точке мы можем составить мнение об общей плотности негатива. Именно по этой точке определяется светочувствительность черно-белой негативной кинопленки.